

DSP 를 이용한 초음파 C-scan 시스템 개발

남영현*, 성운학*, 김정태*

Ultrasonic C-scan System Development Using DSP

Young Hyun Nam*, Un Hak Seong*, Jeong Tae Kim*

ABSTRACT

Digital signal processor (DSP) is used to obtain the peak value and the time difference of ultrasonic signals, to make digital filter, and to derive mathematical transformation from analog circuit. In this study, C-scan system and control program have been developed to high speed data acquisition. This system consists of signal processing parts (DSP, oscilloscope, pulser/receiver, digitizer), scanner, and control program. The developed system has been applied to a practical ultrasonic testing in overlay weld, and demonstrated high speed with precision

Key Words : Digital Signal Processor(DSP), Ultrasonic(초음파), C-scan(C-스캔), Overlay weld(덧살용접)

1. 서론

고온고압 수소분위기에서 사용되는 압력 용기강은 내식성을 향상시키기 위해서 일반적으로 압력용기 내면에 오스테나이트 스테인레스강을 덧살용접하여 사용하고 있다. 그러나, 이와 같은 압력용기는 운전 후 상온으로 내려 정지한 후, 일정시간이 경과하면 덧살 용접층과 모재의 경계면에 집적되었던 수소에 의하여 내표면에 파괴가 일어나는 수소유기박리현상(Hydrogen Induced Disbonding: HID)이 발생되어 압력용기의 수명에 중대한 영향을 미치게 된다.⁽¹⁻⁹⁾

덧살용접부의 접합상태를 초음파를 이용하여 정량적으로 평가하는 일은 용접제품의 신뢰성 향상이나 품질관리면에서 대단히 중요하다. 현재, 덧살용접부에 대한 초음파검사는 수작업에 의존하는 경우가 많고, 과도한 검사시간이 소요되어 원가절감 및 납기 단축면에서 개선이 요구되고 있다. 이

러한 문제점 해결을 위하여, 당사 기술연구원에서는 제품의 검사속도를 개선하고, 실시간(Real time)으로 데이터 처리를 가능하게 하기 위하여 DSP를 이용한 초음파 C-scan 시스템과 검사 프로그램을 개발하였다.

DSP는 아날로그 신호에서 변환된 디지털 신호를 실시간으로 고속처리 하는 전용 프로세서로 1980년대 초에 등장하였으며, 초창기에는 가격이 고가인 관계로 모뎀의 통신이나 화상처리, 서브모터의 제어 등 용도가 한정되었으나, 최근에는 디지털 신호처리기술의 발달과 전용 칩(chip) 개발에 따라 다양한 분야로 확대되고 있다. 비파괴분야에서도 화상과 신호처리를 위해 DSP의 사용이 보편화되고 있는 추세이다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

현재 비파괴검사는 고도로 발달한 LSI(Large Scale Integration: 고밀도 집적회로)기술을 바탕으로 디지털 신호처리 기술의 발전에 따라 아날로그 회로에 의해 처리되는 부분을 디지털화하여 경량화

* 한국중공업 기술연구원

및 소형화되는 추세이고, 가격도 많이 하락하여 사용자들에게 많은 편리함을 제공하고 있다.

본 연구에서는 고속으로 비파괴검사를 수행하기 위하여 DSP를 이용한 초음파 C-scan 시스템과 디지털 신호처리 프로그램을 개발하였다. 또한, 개발된 시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 교정블럭의 인공결함 및 실제 수소유기박리가 발생한 용접부를 C-scan 하여 얻은 결과와 파괴법으로 측정된 결함의 크기를 비교 검토하였다.

2. DSP 의 이론적 배경

본 검사 시스템은 결함으로부터 초음파 반사 신호의 최대값 계산 및 디지털 필터의 속도를 빠르게 하기 위해서 DSP 상에서 처리하였고, 이미지 디스플레이, 사용자 인터페이스 등은 컴퓨터의 CPU 에서 처리하도록 하였다.

디지털 필터는 모터 구동을 위한 펄스 신호 및 주위 환경에 의한 노이즈를 제거하기 위하여 사용하였으며, 아래와 같은 신호처리 과정을 거치게 되어 있다.

아날로그에서 다루는 신호는 일반적으로 시간에 대해 연속이고, 디지털신호에서는 비연속인데 이와 같은 신호를 이산적 신호라고 한다. Fig. 1 은 아날로그 소자에 의한 적분회로를 표시한 것으로 적분회로(1 차 no-pass filter)의 입력신호 $x(t)$ 와 출력신호 $y(t)$ 와의 관계를 1 차 미분방정식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{CR} y(t) = \frac{1}{CR} x(t) \quad (1)$$

이에 대응하는 이산시스템의 입력신호 $x(n)$ 과 출력신호 $y(n)$ 의 관계는 식 (2)와 같이 표시 할 수 있다.

$$y[n] = ay[n-1] + (1-a)x[n] \quad (2)$$

아날로그 시스템에서 입출력의 관계는 일반적으로 미분방정식 및 convolution 으로 표현하는 방법과 전달함수인 Laplace transform 를 이용하여 표현하는 방법이 있다. 이산시스템을 전달함수로 생각하고, Z-변환을 이용하여 얻으면 다음과 같다.

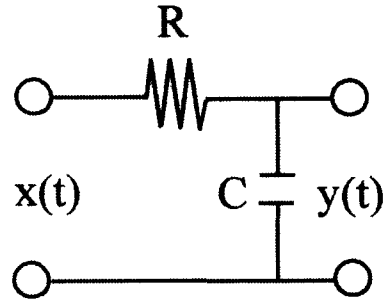


Fig. 1 Analog integral circuit

$x[0], x[1], \dots, x[n]$ 라고 하는 이산적 신호의 Z-변환을 $X(z)$ 로 하면, Z-변환은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x[n]z^{-n} \quad (3)$$

식 (2)의 1 차 차분방정식의 전달함수를 구하기 위해서 식 (2)의 양변을 Z-변환하면, $x[n]$ 의 Z-변환을 $X(z)$, $y[n]$ 의 Z-변환을 $Y(z)$, $y[n-1]$ 의 Z-변환은 $Z^{-1}Y(z)$ 가 되어 식 (4)과 같이 표시할 수 있다.

$$Y(z) = az^{-1}Y(z) + (1-a)X(z) \quad (4)$$

전달함수 $H(z)$ 는 식 (5)과 같이 입력과 출력의 Z-변환비로 정의된다.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (5)$$

따라서, 전달함수 $H(z)$ 는 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.

$$H(z) = \frac{1-a}{1-az^{-1}} \quad (6)$$

식 (6)에 $z = \exp(j\omega T)$ 를 대입하므로 주파수 특성을 구할 수 있는데, T 는 Sampling 간격, ω 는 각속도이다.

식 (2)의 1 차 차분방정식의 주파수 특성을 구하면 식 (7)과 같으며

$$H(e^{j\omega T}) = \frac{1-a}{1-a \exp(-j\omega T)} \quad (7)$$

초음파 신호의 진폭은 식 (8)과 같이 표시할 수 있다.

$$|H(\omega)| = \left| \frac{1-a}{1-a \exp(-j\omega T)} \right| = \frac{1-a}{\sqrt{1+a^2-2a \cos(\omega T)}} \quad (8)$$

이상과 같은 방법을 이용하여 아날로그 회로에서의 초음파 신호를 DSP 상에서 디지털 신호로 변환할 수 있다.

본 시스템에서는 간단하면서도 빠른 처리 속도를 위해 이동평균을 이용한 필터를 사용하였는데, 이를 차분방정식으로 표시하면 식 (9)과 같다.

$$y[n] = \frac{1}{5} \sum_{k=0}^4 x[n-k] \quad (9)$$

또한, 필터의 전달함수 $H(z)$ 와 진폭의 특성 $|H(\omega)|$ 을 계산하면, 식 (10)와 (11)과 같이 표시할 수 있다.

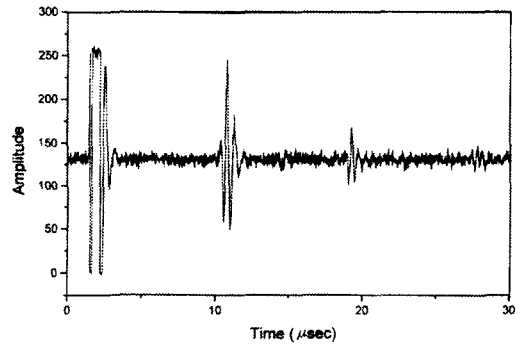
$$H(z) = \frac{1}{5} \sum_{k=0}^4 z^{-k} \quad (10)$$

Fig. 2는 DSP 필터를 사용하기 전과 사용한 후에 얻은 초음파 신호를 비교한 것으로, DSP를 사용하므로 초음파 신호중 노이즈(noise)가 제거되어 깨끗한 반사신호를 관찰할 수 있다.

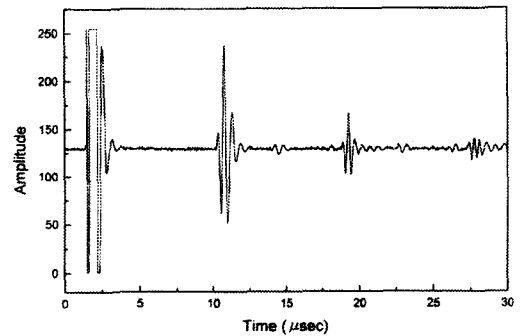
$$|H(\omega)| = \frac{1}{5} |2 \cos(2\omega T) + 2 \cos(\omega T) + 1| \quad (11)$$

3. 검사시스템의 구성

본 자동화 검사시스템은 Fig.3에 표시한 것과 같이 크게 Pulser/Receiver, DSP, 스캐너, 제어 프로그램으로 구성되어 있다.



(a) Raw RF signal



(b) Result processed by DSP from raw RF signal

Fig. 2 Signal processed by Digital Signal Processor

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 C-scan 장치 사진을 보여주고 있다.

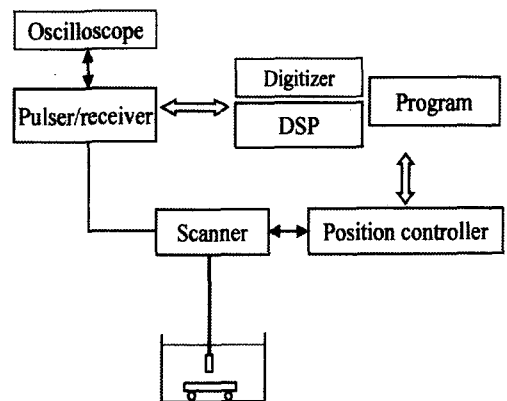


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up for C-scan

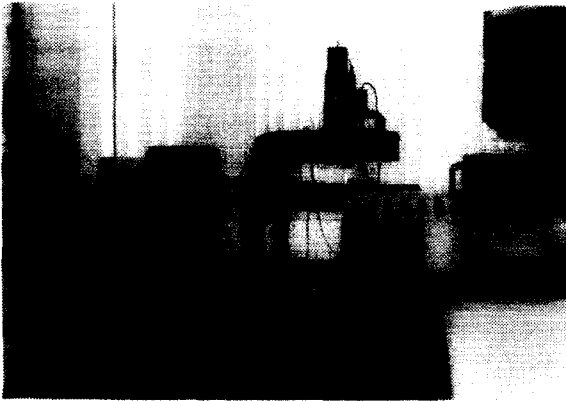


Fig. 4 Developed system photograph

3.1 Pulsar/Receiver

Pulsar/Receiver 는 탐촉자가 초음파를 발생시키기 위해 필요한 전기펄스 신호를 보내고, 결함에 서 반사된 신호를 검출하여 증폭하는 역할을 한다

3.2 DSP

본 실험에 사용된 DSP 는 Texas instrument 사의 TMS320C31(DSP 명) 32bit floating-point Digital Signal Processor 로 40 MHz clock 에서 동작하여 40 million Floating-Point Operations Per Second (MFLOPS)의 성능을 가지고 있다. 이 DSP 를 사용하여 1024 점의 데이터를 고속 푸리에 변환(furior transform) 시키는데 소요되는 시간은 3 ms 이다. DSP 상의 프로그램은 잡음제거를 위해 디지털 필터, 신호의 실시간 최대치와 시간차 계산을 위한 프로그램이 사용되었으며, 컴퓨터상의 측정 프로그램과는 windows DLL (Dynamic Link Library)형식의 interface library 를 통해 연결되어 있다. 아날로그 신호의 A/D 변환은 8bit, 40 Mega-sampling rate 의 digitizer 에서 이루어지며, 디지털로 변환된 신호는 DSP 보드의 parallel interface 를 통해 직접 전송하도록 하여 처리속도를 빠르게 하였다.

Digitizer 는 아날로그인 초음파 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위한 것으로, 사용 주파수와 분해능에 따라 여러 종류가 있고 주파수가 1~10 MHz 이면 최대 100 Mega-sampling rate 가 필요하다. 본 시스템에서는 데이터양의 신속한 처리를 위해서 컴퓨터의 AT Bus 에 직접 연결하는 방식을 선택하였다.

3.3 스캐너

스캐너는 탐촉자의 위치를 검사위치로 이동시키는 장치로 검사제품의 형상에 따라 제어 프로그램을 수정하여 자유롭게 검사할 수 있도록 3 축으로 구성되어 있다. 스캐너는 초음파 탐촉자를 지지하고 운동방향을 결정하는 Motion units 와 units 에 힘을 가하여 이동시키는 모터부분으로 구성되어 있다.

Micro step motor 로 구성된 위치 제어부는 컴퓨터의 명령에 따라 최소 40 μm 단위로 이동이 가능하며, 이때 위치값은 제어부내의 기록계에 저장되고 컴퓨터에 feed-back 하도록 되어 있다. 따라서, 아날로그 신호를 digitizer 에서 디지털 신호로 변환시킨 후, DSP 에서 각종 신호처리를 하므로 어떠한 Pulsar/Receiver 신호도 입력이 가능하며, 얻고자 하는 다양한 정보를 실시간에 측정할 수 있다.

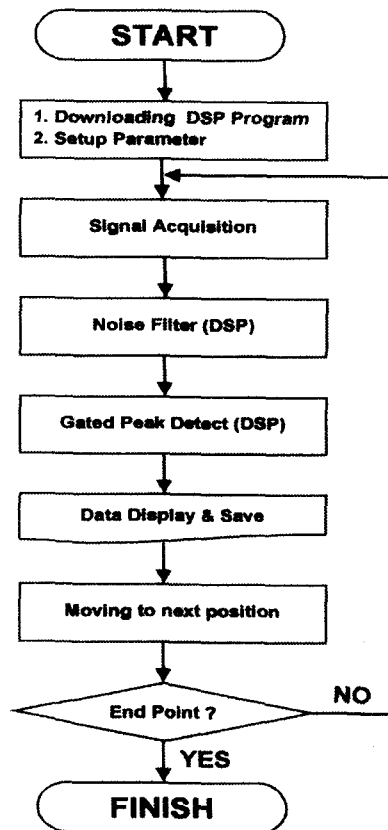


Fig. 5 Flow chart of control program in C-scan system

3.4 제어 프로그램

Fig. 5 는 본 연구에서 개발한 제어 프로그램의 순서도를 나타내고 있다. 프로그램은 초음파 신호를 얻는 signal acquisition 부, 탐촉자의 위치를 제어하는 위치제어부, 신호처리부, 화상처리부로 구성되어 있다. 위치제어부는 탐촉자를 컴퓨터에 의해 검사위치에 이동시키기 위한 제어 프로그램으로 단순한 step 형식의 이동이 아닌, 속도와 가속도를 정확히 제어할 수 있도록 개발하였다.

Fig. 6 은 프로그램의 초기화면으로 스캐너의 위치, 속도, 가속도, 방향 등의 제어가 가능하고, 0.1 초 간격으로 현재의 정보가 화면에 표시되도록 되어 있다. 또한, 프로그램은 검사속도에 직접 관여하는 Digitizer, DSP 와 같은 data acquisition 부분은 어셈블리로, 그 이외의 부분은 Visual basic 으로 작성하였다.

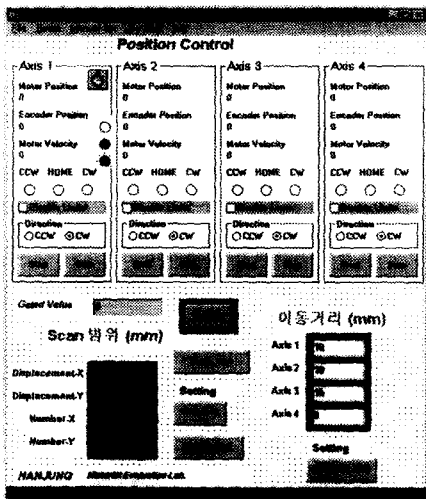


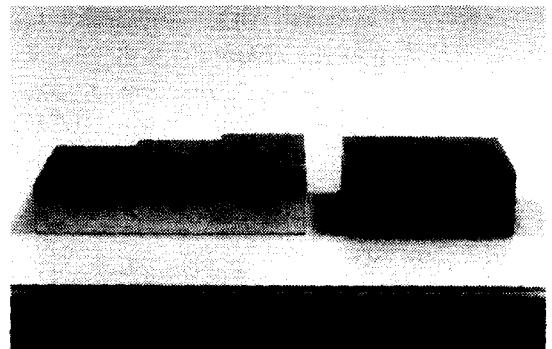
Fig. 6 Primary screen with main program being executed

4. 덧살용접 기술현황

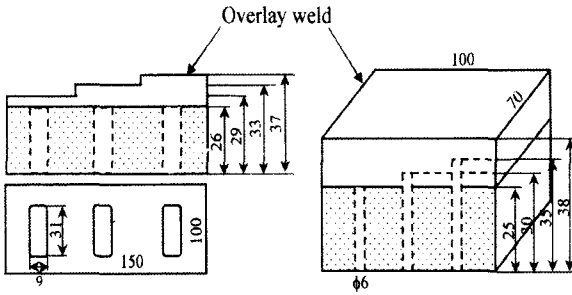
현재 사용하고 있는 석유화학관련 압력용기의 덧살용접은 반응기의 사용조건에 따라 다양한 종류의 오스테나이트계 스테인레스강이 사용되고 있으며, 그 중에서도 중질유 탈황반응기와 같이 강한 부식성 분위기에서 사용되는 덧살재는 AISI-347 인 경우가 많다. 이 재료는 탄소와의 친화력이 큰 Nb 을 첨가하여 C 을 NbC 로 고정시키므로,

입계에서 Cr-탄화물 생성을 억제하여 내식성을 증대시킬 목적으로 합금 설계된 재질이다. 그러나, 용접성의 측면에서 볼때 Nb 는 그 자체가 페라이트 생성원소(Ferrite Former)일 뿐만 아니라, 강한 오스테나이트 생성원소인 C 를 고정시키므로 소량을 첨가시켜도 현저히 페라이트 생성을 촉진시키고 있다. 따라서, 다층용접에서 일층을 AISI-347 계로 덧살용접할 경우 다량의 δ -Ferrite (응고시 생성되는 Ferrite)가 형성되고, 이 δ -Ferrite 는 다량의 Cr 을 함유하므로 용접후열처리 (PWHT)시 급속간 화합물로 극히 취약하고 경도가 높은 σ 상 및 오스테나이트로 분해되어 균열의 발생 가능성(σ -Phase embrittlement)이 대단히 높은데, 그 원인은 수소유기박리(Hydrogen Induced Disbonding)가 주원인으로 되고 있다.

수소유기박리의 발생기구는 덧살용접 및 PWHT 에 의한 경계면에서의 야금학적 열화와 정지시 조업중 확산 침입한 수소가 잔류응력의 원인이 되어 생긴 지연파괴(delayed fracture)로 규명되었다. 여기서 재료의 야금학적 열화라 함은 용접시 경계부의 덧살용접층에 조대한 오스테나이트 결정립이 형성되고, 이 오스테나이트 결정의 입계에 PWHT 시 용접 잔류응력으로 다량의 Cr 탄화물이 석출되는 현상을 말한다. 이러한 탄화물은 입계강도를 저하시키고, 수소취화의 원인이 되므로 파손은 대부분 조대한 오스테나이트 결정입계를 따라 발생한다.



(a) Photograph



(b) Overlay weld specimen of stainless steel

Fig. 7 System calibration block

Fig. 7(a)은 압력용기의 덧살용접부에 대한 초음파검사 시 장비의 교정을 위해 사용하고 있는 교정 블럭(calibration block)이며, 인공결합의 깊이는 Fig. 7(b)와 같이 $\phi 3\sim 13$ mm 인 원형결합과 사각결합(9×31 mm)을 가지고 있다.

5. 초음파 실험

실험에 사용한 수침형 초음파 탐촉자는 주파수가 15MHz, 직경은 12.7mm, 초음파 빔의 집속거리가 38.1mm 인 탐촉자를 사용하였다. C-scan 화상은 집속탐촉자로부터 송신된 초음파가 경계면이나 접합 계면에서 반사되는 경우, 경계면의 접합 저면에 초점이 정확히 설정되어 집속된 상태일 때 반사파는 가장 높은 에코(echo)를 갖게 된다. 따라서, 반사파의 에코 레벨[0~255]을 청색(blue: 0), 녹색(green: 128), 빨간색(red: 255) 등의 칼라 contrast를 갖게 하여, 결합이 존재하지 않는 부분은 반사파의 신호가 거의 존재하지 않기 때문에 에코 레벨이 가장 낮은 청색 칼라로, 결합은 에코 레벨이 높은 빨간색으로 표시하였다.

6. 검사시스템의 성능 검증

Fig. 8은 본 시스템의 성능을 검증하기 위하여 동전을 C-scan 한 것으로, 동전의 표면이 선명하게 나타나고 있다.

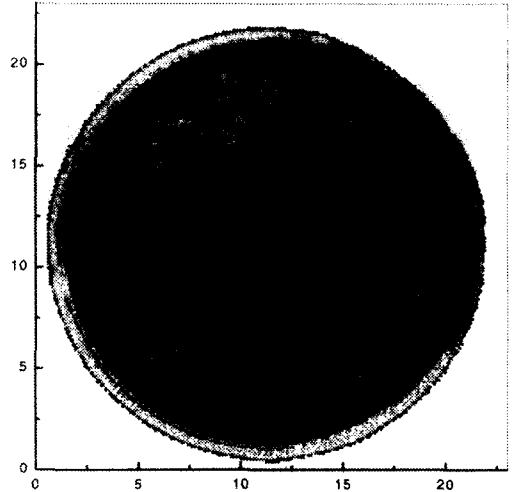
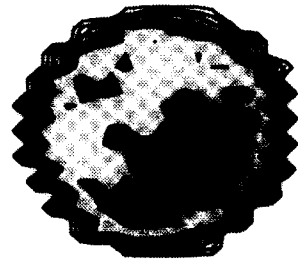
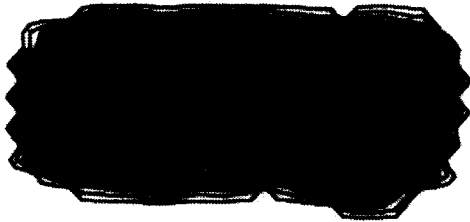


Fig. 8 C-scan image obtained in coin specimen

Fig. 9는 Fig. 7의 교정블럭을 이용하여 얻은 C-scan 화상이다. Overlay 층의 두께는 3 mm로 인공결합과 같은 정확한 원형 및 직사각형의 화상을 얻지 못하였는데, 그 이유는 overlay 층을 전파하는 초음파 빔의 초점이 정확히 한 점에 집속되지 못하고, 결합 단부(端部)에서 반사파가 상쇄 및 간섭을 일으켜 진폭이 급격히 변화하기 때문에 인공결합과 같은 정확한 화상을 얻을 수 없었다고 생각된다. 또한, 스테인레스강 내를 전파하는 초음파 에너지가 매질 자체의 거칠고 불규칙한 입자분포 때문에 높은 감쇠를 가져온 것도 한 원인이라고 사료된다. 그러나, 결합의 형상 및 크기를 측정하는데는 큰 문제가 없다고 생각된다.



(a) Flat bottom hole ($\phi 6$ mm)



(b) Rectangular defect (9×31 mm)

Fig. 9 C-scan image obtained in overlay weld of stainless steel

Overlay 층의 두께가 7mm 이상인 경우, 반사신호의 높은 감쇠로 인하여 정확한 결함화상을 얻을 수 없었는데, 이는 검출하려는 결함의 깊이가 결함 검출능을 좌우하는 중요한 변수임을 알 수 있었다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 높은 에너지 발생이 가능한 pulser 또는 고주파수의 탐촉자를 사용하거나, 수은과 같은 접촉매질을 사용하므로 결함의 검출능을 향상시킨다는 보고가 있으나, 현장에서의 검사환경 등을 고려할 때 불가능한 일이 많으므로 종합적인 상황을 검토한 후 설정할 필요가 있다고 사료된다.

Fig. 10 은 스테인레스강의 덧살용접층의 수소유기박리를 검사하기 위하여 실제 제품에서 발생한 자연결함을 C-scan 한 것으로, 결함의 형상 및 위치를 판별할 수 있다.

7. 결론

다양하고 복잡한 형상을 가지는 제품을 신속하게 검사하기 위하여 DSP를 이용한 C-Scan 자동화 검사시스템과 측정에 필요한 제어 프로그램을 개발하였다. 본 시스템은 짧은 시간과 간단한 조작으로 초음파검사를 수행할 수 있도록 되어 있으며 overlay 용접부에 존재하는 인공결함과 자연결함을 검사한 결과, 결함의 형상 및 위치를 정확히 예측할 수 있었다.

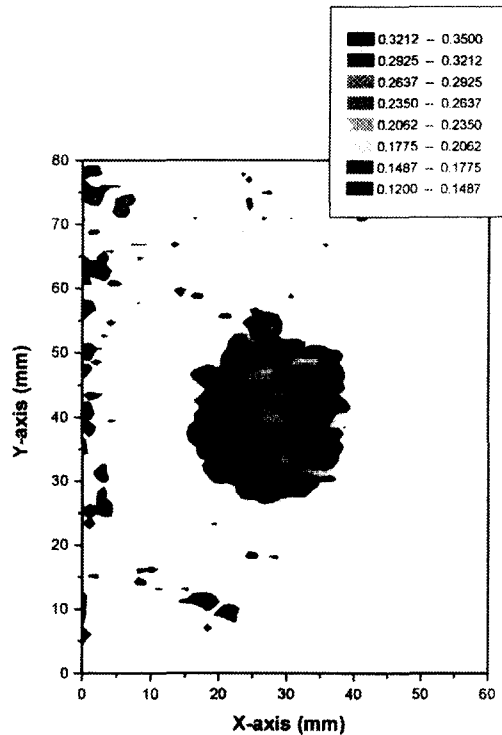


Fig. 10 C-scan image of hydrogen induced disbonding

참고문헌

1. J.Watanabe et al., "HID of stainless weld overlay found in desulfurizing reactor" ASME, pp. 1, 1981.
2. J.Watanabe et al., "Study on hydrogen embrittlement of pressure vessels overlaid with stainless steel," Part I, JHPI, Vol. 18, No. 5, pp. 31, 1980.
3. T. Hasegawa, Personal Letter from Bob-Cock Hitachi Co.
4. T. Fujii et al., "A safety analysis on overlay disbonding of pressure vessels for hydrogen service"
5. J.Watanabe et al., "Study on hydrogen embrittlement of pressure vessels overlaid with stainless steel," Part 2, JHPI, Vol. 18, No. 5, pp. 39, 1980.
6. M. Suwa et al., "resistance to HID if heavy gauge rolled Cr-Mo clad steel," JHPI, Vol. 31, No. 6, pp. 21, 1993.
7. J.Watanabe et al, "On the cracks in stainless steel

- internal attachment welds for high temperature high pressure hydrogen service," NACE International corrosion conference, No. 104, 1997.
8. F. de Kazincy, "On the pressure of hydrogen in cavities of steel," Acta Metal, Vol. 7, pp. 525, 1959.
 9. D. M. Allen Booth and J. Hewitt, " Mathematical model describing the effect of microvoids upon the diffusion of hydrogen in iron and steel," Acta Metal, Vol. 22, pp. 171, 1974.
 10. L. Stuart, "Wave digital filters DSP applications," IEEE Circuit & Devices magazine, Vol. 8, pp. 27, 1992.
 11. K.I. McRae, T.L.Miller, "Signal Processing and data acquisition technique for the ultrasonic nondestructive evaluation of aerospace materials," Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 38, pp. 16, 1992.
 12. P.V. Raja, S. Ganesan, "SIMD multiple DSP microprocessor system for image processing," Microprocessors and Microsystems, Vol. 15, pp. 493, 1991.